

## LDX2101 ÉS 2205 TÍPUSÚ DUPLEX ACÉL LÉZERSUGARAS ÉS VOLFRÁMELEKTRÓDÁS HEGESZTÉSE

### A hegesztési technológiák hatása a varratok szövetszerke- zetére

## LASER WELDING AND TIG WELDING OF LDX2101 AND 2205 TYPE DUPLEX STAINLESS STEELS

### The effect of welding process on the weld microstructure

**Lőrinc Zsuzsanna**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudomá-  
nyi Egyetem,  
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.  
E-mail: [zsuzsanna.lorinc@gmail.com](mailto:zsuzsanna.lorinc@gmail.com)

**Dobránszky János**

MTA–BME  
Kompozittechnológiai Kutatócsoport,  
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.  
[dobranszky.janos@eik.bme.hu](mailto:dobranszky.janos@eik.bme.hu)

*Kivonat: A duplex acélok hegesztett kötéseiben a hegesztés során bevitt hő és a nagy hűlési sebesség hatására a ferrit-ausztenit arány jelentősen eltérhet az alapanyag fázisarányától. Az eltérő fázisarány miatt a hegesztett kötések korrózióval szembeni ellenállása és mechanikai tulajdonságai elmaradnak az alapanyag jellemzőitől, ezért kívánatos a megfelelő fázisarány kialakítása a hegesztett kötésekben. Jelen dolgozatban az LDX2101 és a 2205 típusú duplex acélok lézersugaras, illetve volfrámelektrodás, védőgázos hegesztési kísérleteit és a varratok metallográfiai vizsgálatát ismertetjük, különös tekintettel az ausztenit mennyiségének meghatározására. Az eredmények alapján következtetéseket vonunk le az ausztenit mennyiségét leginkább befolyásoló hegesztéstechnológiai tényezőkre vonatkozóan.*

*Abstract: The high heat input and rapid cooling rates has a negative effect on the ferrite-austenite ratio in the welded joints of duplex stainless steels. The different ferrite-austenite ratio cause a reduced corrosion resistance and reduced mechanical properties, so it is desirable to achieve an appropriate ferrite-austenite ratio in DSS welds. In this paper our aim is to present the welding experiments and metallography results of laser and TIG welded joints of LDX2101 and 2205 type duplex stainless steel plates. On the base of results, we want to summarize some conclusions regarding to the technological parameters, which have the greatest effect on the austenite proportion in the weld metal and the heat affected zone.*

## 1. Bevezetés

Az ipar egyes területein széles körben elterjedt a korrózióálló acélok használata. Az olaj- és a vegyiparban használt nyersanyagok erősen redukáló, illetve korrozív közegnek minősülnek a hagyományos szerkezeti acélokra nézve. A növekvő ipari igények kielégítésére, először az 1920-as évek végén gyártottak és hoztak forgalomba duplex acélt. Az acél sajátossága, hogy szövetszerkezete nagy arányban, közel 50-50%-ban tartalmaz delta-ferritet és ausztenitet. A duplex acélok erősen ötvözött, korrózióálló acélok. Fő ötvözőik a króm (Cr), nikkel (Ni), a molibdén (Mo) és a nitrogén (N), amelyek hatására a duplex acélok korrózióval szembeni ellenállása az ausztenites acélokénál is jobb. [1]

A korai duplex acél típusok megmunkálása és hegesztése számos nehézségbe ütközött. A hegesztési varratok kis szívóssága miatt, csak néhány területen tudták használni ezeket az acélokat. A gyártástechnológia fejlődése és a folyamatos fejlesztések hatására az 1970-es években megjelentek olyan duplex acélok, amelyekhez a gyártás során nitrogént adtak, ami javította a hegeszthetőséget. Az 1980-as évek végén megjelentek az ún. harmadik generációs duplex acélok, amelyek kémiai összetételét nagyon pontosan szabályozták a gyártás során. [1] A megnövelt nitrogéntartalomnak köszönhetően javult a duplex acélok hegeszthetősége, ami nagyban elősegítette a szélesebb körben való elterjedésüket.

Manapság egyre több területen használnak duplex acélokat. A fejlődés megköveteli a duplex acélok tulajdonságainak egyre pontosabb ismeretét. A hagyományos anyagmegmunkáló technológiák mellett, egyre nagyobb hangsúlyt kap a lézersugaras anyagmegmunkálás, melynek a duplex acélokra való alkalmazhatósága is előtérbe került. A lézersugaras hegesztés nagy hőbevitellel járó folyamat, amely jelentősen megváltoztathatja a duplex acélok fázisarányát az alapanyaghoz képest. A megváltozott ferrit-ausztenit arány hátrányosan befolyásolja az acél mechanikai tulajdonságait és korrózióval szembeni ellenállását, ezért fontos, a megfelelő hegesztéstechnológia, védőgáz és hozaganyag kiválasztása.

## 2. Az elvégzett kísérletek

A lézersugaras hegesztéshez vízsugaras vágással  $1,5 \times 40 \times 100$  mm méretű mintadarabokat vágattunk ki LDX 2101 és 2205 típusú acélokból (1. táblázat). Noha a vízsugaras vágás során kevés sorja keletkezik, azonban annak érdekében, hogy a mintadarabok hézagmentesen illeszkedjenek egymáshoz, a mintadarabok oldalait marógéppel lemunkáltuk és párhuzamosítottuk. A tompakötés létrehozásához az így előkészített próbadarabokat a hosszanti oldaluk mentén összeillesztettük, és az összeillesztett darabok két végét argon védőgázos volfrámelektrodás (TIG) ponthegesztéssel egymáshoz hegesztettük. A később TIG-hegesztéssel meghegesztett próbadarabokat annak figyelembevételével illesztettük össze, hogy a szakirodalmi ajánlások szerint a hegesztéshez hegesztőpálcát kell használni, és 2,0 mm-es hézagot kell hagyni az összehegesztendő élek között [2].

Az argon védőgázos volfrámelektrodás ívhegesztés kézi kivitelezése során, az argon védőgázhoz néhány százalék nitrogén gázt kevertünk; kísérleti tényezőként változtattuk a gázkeverék nitrogéntartalmát, összesen háromféle próbadarabot készítettünk.

A lézersugaras hegesztést a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-ben működő, diódapumpált, Rofin DY 027 típusú Nd:YAG berendezéssel végeztük.

Acél jele	Kémiai összetétel, tömeg%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu
LDX 2101	0,023	0,66	4,97	0,022	0,001	21,49	1,51	0,29	0,228	0,25
2205	0,019	0,37	1,42	0,022	0,001	22,4	5,8	3,16	0,177	-

1. táblázat: A kísérletekben felhasznált duplex acélok kémiai összetétele

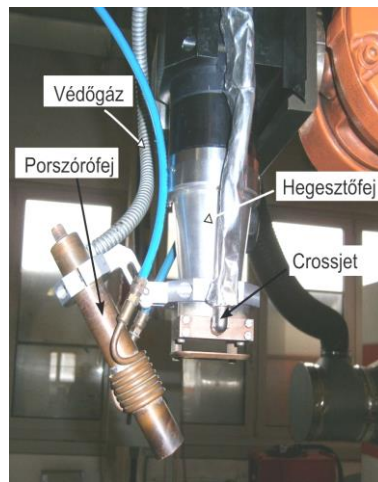
A felhasznált hozaganyagok	Kémiai összetétel (tömeg%)							
	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	C	N	Mn
Metco 41C por	Fő alkotó	17	12	2,5	2,3	0,03	-	-
LDX 2101 pálca	Fő alkotó	23	7	<0,5	0,4	0,02	0,14	0,5

2. táblázat: A hegesztéshez használt por és pálca kémiai összetétele

Az előzőleg összefűzött mintadarabokat egy leszorító készülékbe tettük. Előtte a leszorító készüléket egy stabil állványra helyeztük, vízszinteztük és gyorszorítóval lerögzítettük. A kísérleti terv szerint, adott védőgáz-összetétel esetén azonos technológiai tényezőkkel, poradagolással és a nélkül is készítettünk varratokat, majd megváltoztattuk a védőgáz összetételét, és ismét ugyanazokkal a tényezőkkel készítettünk varratot, ismét csak porszórással és porszórás nélkül. A porszóráshoz a Sulzer Metco által gyártott Metco 41C típusú fémszórási port használtuk, amelyet ausztenites acél rétegek felszórására használnak. A por összetételét a 2. táblázat tartalmazza. A szakirodalom szerint, a duplex acélok porszórásos hegesztése esetén olyan port célszerű használni, amelynek nikeltartalma 2–4%-kal nagyobb az alapanyag nikeltartalmánál [1].



1. ábra: A lézerfejet mozgató robot



2. ábra: Porszóróval felszerelt hegesztőfej

A lézersugaras hegesztési kísérletek során változtattuk a védőgáz összetételét és az előtolási sebességet. A 19 összefűzött próbadarabból, 14 db jól értékelhető és vizsgálható hegesztett kötést sikerült elkészítenünk.

### 3. A kísérletek eredményének értékelése

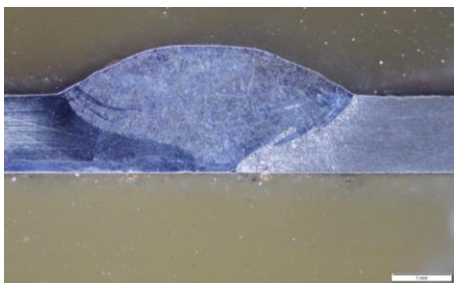
#### 3.1 A ferrittartalom meghatározása ferritszkóppal

A hegesztést követően Fischer FMP 30 ferritszkóppal megmértük a varratok ferrittartalmát úgy, hogy a koronaoldalon és a gyökoldalon is 3-3 pontban mértünk. Mindegyik mérési pontban három mérést végeztünk és a három mérés átlagát tekintettük az adott pont ferrittartalmának. A számított átlagértékek alapján elmondható, hogy a lézersugaras hegesztésnél a porszórással készült varratok ferrittartalma minden minta esetén kisebb, mint az ugyanolyan hegesztési paraméterekkel, de porszórás nélkül készített varratoké. A volfrámelektrodás, védőgázos ívhegesztéssel készült varratok ferrittartalma kisebb a lézersugaras hegesztéssel készült varratok ferrittartalmánál.

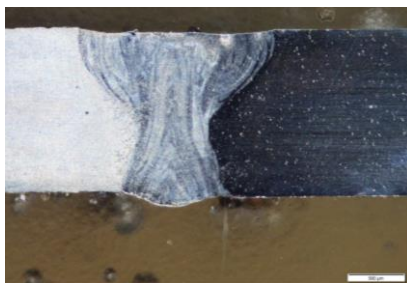
A mért értékek szórása több esetben is 5% feletti, amiből az következik, hogy a ferritszkópos mérés ebben az esetben nem elég pontos, mert a varrat geometriája jelentősen befolyásolja. A pontosabb méréshez a hegesztési varratdudorokat le kell munkálni.

#### 3.2 Metallográfiai vizsgálat

A hegesztési varratok tanulmányozásához a varratokra merőleges keresztcsiszolatokat készítettünk. A ferrit és az ausztenit fázis megkülönböztethetősége céljából színes maratást alkalmaztunk. A 3. és 4. ábrán láthatók a réz-kloridos marószerezrel makróra mart varratokról készült sztereomikroszkópos képek.



3. ábra: TIG-hegesztéssel készült varrat

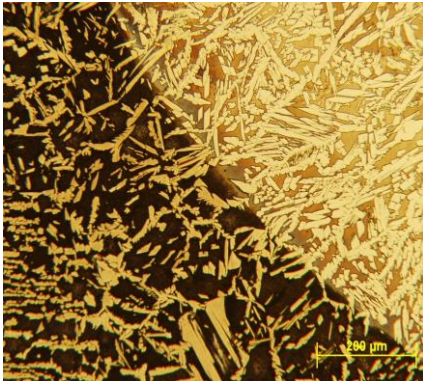


4. ábra: Lézersugaras hegesztéssel készült varrat

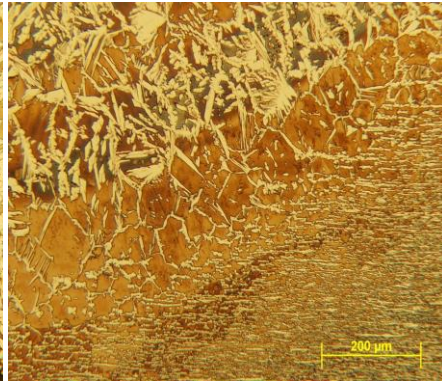
Az 5. és 6. ábrán jól látható, hogy a TIG-hegesztéssel készült varratoknál a különböző anyagi minőségű acélok hőhatási zónájának szövetszerkezete eltérő. Az LDX 2101 típusú acél hőhatási zónájában, a ferritszemcsék határain és a szemcséken belül is képződött ausztenit. A 2205 típusú duplex acél hőhatási zónájában kevesebb ausztenit képződött a ferritszemcsék határain és a szemcséken belül és a ferritszemcsék durvulása is megfigyelhető, ugyanis a  $\delta$ -ferritből szilárd fázisban kialakuló ausztenit, nagy hőmérsékleten, a szemcsehatárokon képződik, kisebb hőmérsékleteken pedig a ferritszemcséken belül is megindul az ausztenitképződés [3] [4].

A varratfémekben az ausztenitszemcsék Widmanstätten-mintázatúak. Ebben az esetben is a szemcsehatáron indult meg az ausztenitképződés, és a szemcsehatárról a kiala-

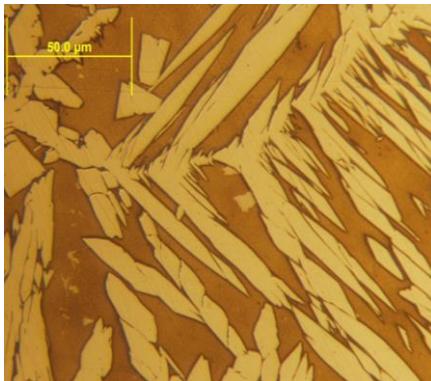
kult összefüggő ausztenitszemcse a növekedése közben behatolt a ferritszemcse belsejébe. A 7. ábrán láthatók a hosszanti irányú, Widmanstätten-típusú tűs ausztenitszemcsék, a mellette lévő, sűrűn elhelyezkedő kisebb szemcsék más, tűs, Widmanstätten-típusú ausztenitszemcsék részei, amelyek éppen közel merőlegesek a mellettük lévő szemcsére.



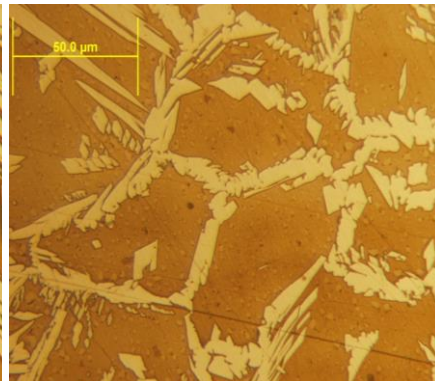
5. ábra: A varratfém és a hőhatásövezet határa (LDX2101, 2-es minta, TIG)



6. ábra: A varratfém és a hőhatásövezet határa (2205-ös acél, 2-es minta, TIG)



7. ábra: A varratfém szerkezete (3-as minta, TIG)



8. ábra: Hőhatásövezet (2205, 3-as minta, TIG)

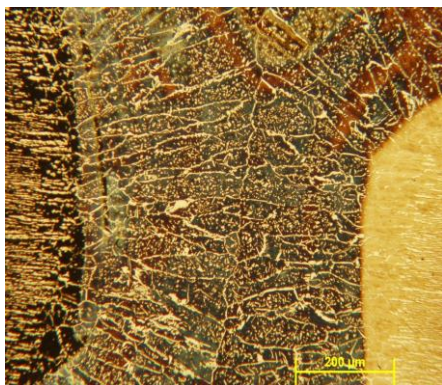
A lézersugaras hegesztés esetén a varratfém szövetszerkezete jelentősen eltér a TIG-hegesztéssel készült varratok szövetszerkezetétől. Előbbi esetén a hosszanti irányban megnyúlt ferritszemcsék orientációja a hegesztés közben kialakult hőmérsékleti gradiens irányát követi (9-11. ábrák). A ferritszemcsék határain vékony ausztenitháló alakult ki, amely néhány helyen megszakad (10. ábra). A ferritszemcséken belül egymástól különálló, apró ausztenitszemcsék váltak ki. A hőhatásövezetben a szemcséken belül nagyon kevés ausztenit képződött. A fentiekben leírt szövetszerkezet hasonló a szakirodalomban bemutatott elektronsugaras hegesztéssel készült varratok szövetszerkezetéhez [3].

Az ausztenitképződés sebességét a nitrogéndiffúzió sebessége határozza meg. Nagy hőmérsékleten több nitrogén oldódik a ferritben, mint kisebb hőmérsékleten, ami azt jelenti, hogy hűlés közben csökken a ferrit fázis nitrogéntartalma. A felszabaduló nitrogén a

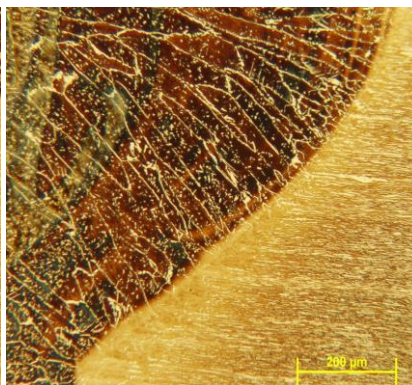


szemcsehatárokat diffundál, ahol megindul az ausztenitképződés. Először a szemcsehatárokon indul meg az ausztenitképződés, amit a Widmanstätten-szerkezet kialakulása követ, végül pedig a ferritszemcséken belül képződik ausztenit. Mindez a ferritszemcse méretétől és a hűlési sebességtől függ. [1] A  $\delta$ -ferrit ausztenitté történő átalakulása során az ausztenit szemcsenagysága kisebb, mint a kiinduló ferrit és lényegesen kisebb, mint az ausztenitesen kristályosodó korrózióálló acéloké [5].

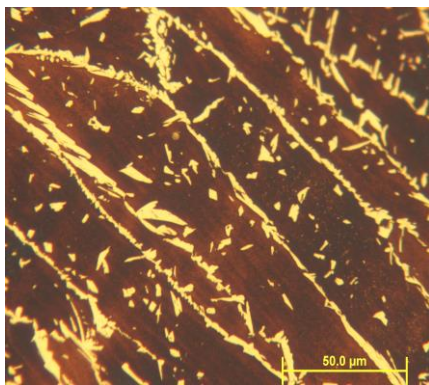
A kétféle hegesztési eljárással készült varratok eltérő szövetszerkezete eltérő hűlési sebességre utal [1]. A lézersugaras hegesztés esetén nagyobb volt a hűlési sebesség, ami miatt kevesebb ausztenit képződött, mint a TIG-hegesztéssel készült varratok esetén. Mindezt a ferrittartalom-mérési eredményeink is alátámasztják.



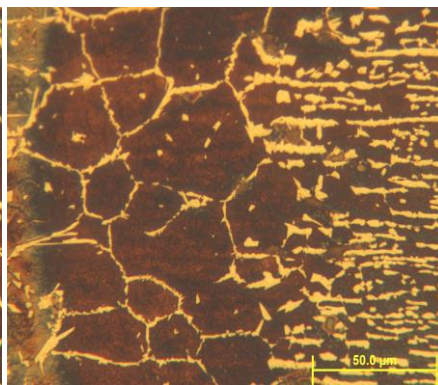
9. ábra: A varratfém és a hőhatási zónák (lézersugaras hegesztés, 12-es minta)



10. ábra: A varratfém és a hőhatási zóna határa (lézersugaras hegesztés, 2205-ös acél, 12-es minta)



11. ábra: A varratfém hosszirányú ferritszemcséi (lézersugaras hegesztés, 12-es minta)

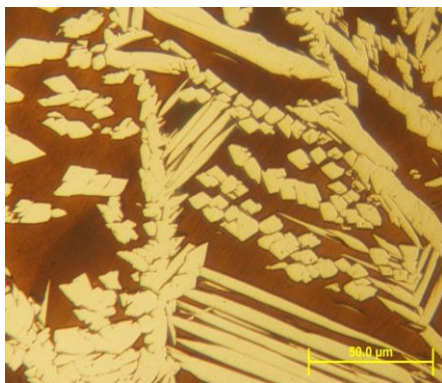


12. ábra: A hőhatási zóna szövetszerkezete (lézersugaras hegesztés, 2205-ös acél, 16-os minta)

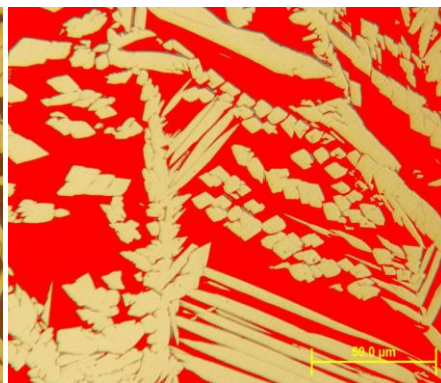
### 3.3 A ferrittartalom meghatározása képelemző szoftver segítségével

A varratfémben és a hőhatási zónában a ferrit-auszténit arányt képelemző szoftver segítségével határoztuk meg, amihez jó minőségű, színes, kontrasztos fénymikroszkópos képekre volt szükségünk.

A maratott varratokról fénymikroszkóppal képeket készítettünk. A hőhatási zónákról és a varratfémről is 500-szoros nagyítású képeket készítettünk, és a fázisarányt a JMicroVision nevű programban a háttér elkülönítésével határoztuk meg (13-14. ábrák). Az eredmények alapján elmondható, hogy a TIG-hegesztéssel készített varratok ferrittartalma minden esetben kisebb a lézersugaras hegesztéssel készült varratok ferrittartalmánál.

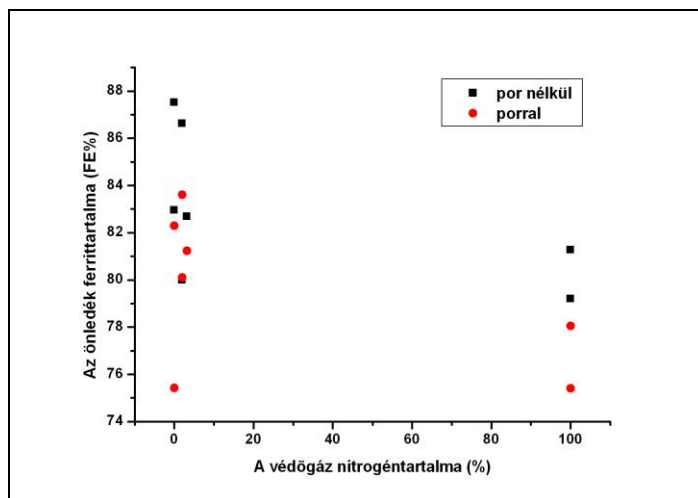


13. ábra: A varratfém színes maratott képe



14. ábra: A háttér elkülönítése JMicroVision szoftverrel

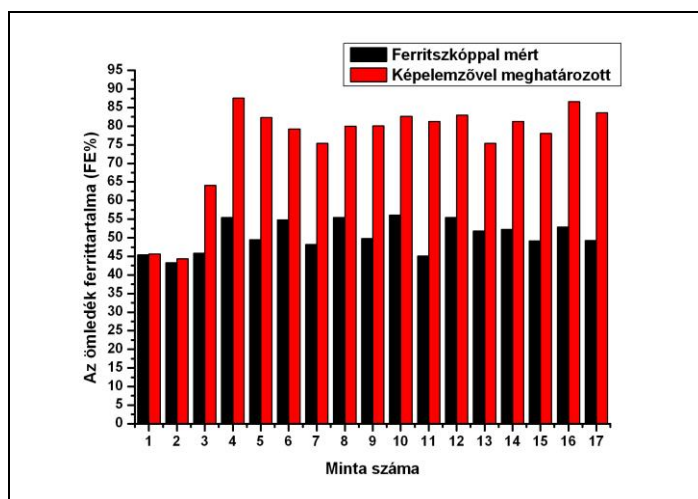
A kapott értékeket grafikonon ábráztuk a védőgáz nitrogéntartalmának függvényében (15. ábra), valamint összehasonlítottuk a ferritszkóppal mért értékekkel is. A védőgáz nitrogéntartalmának nagymértékű növelése, mérhető hatással van a varratok auszténit arányára. Míg a szakirodalomban ajánlott 0,5–2,0% nitrogéntartalom hatásának kimutatásához több minta és/vagy pontosabb mérési módszer lenne szükséges [1]. A ferritszkópos mérések eredményéhez hasonlóan a porszórással készített varratok ferrittartalma itt is kisebb, mint a por nélkül készítettéké.



15. ábra: A varratfém ferrittartalma a védőgáz nitrogéntartalmának függvényében a lézersugaras hegesztéssel készített varratok esetén

A kétféle módszerrel mért ferrittartalom összehasonlításához minden egyes varrat koronaoldalán 3 pontban mért ferrittartalom értékek átlagát vettük, és ezt hasonlítottuk össze a varratfém képelemző szoftverrel meghatározott ferrittartalmával (16. ábra).

A grafikonon az látszik, hogy nagy eltérés van a két mérési módszer között, ezért nem lehet összehasonlítani az értékeket. Annak eldöntésére, hogy melyik módszer ad pontosabb eredményt egy harmadik mérési módszer alkalmazása lenne a megoldás, esetleg az alapanyagon történő mérések összehasonlításával lehetne eldönteni, hogy melyik módszer a pontosabb.



16. ábra: A ferritszkóppal mért és a képelemző szoftverrel meghatározott ferrittartalom értékek



## 4. Összefoglalás

A lézersugaras és a TIG-hegesztéssel készült tompakötések szövetszerkezetének metallográfiai és képelemző szoftverrel végzett vizsgálatával, valamint ferritszkópos méréssel meghatároztuk a varratok ferrittartalmát. A kétféle mérési módszer eredményei egymástól jelentősen eltérnek, ezért nem lehet azokat összehasonlítani egymással.

Az eredmények azonban azt mutatják, hogy a lézersugaras hegesztési varratok ferrittartalma nemcsak a hőhatásövezetben, hanem a varratfémbe is nagyobb, mint a TIG-hegesztési varratok ferrittartalma. A hozaganyag (pálca, por) és a védőgázhoz adott nitrogén, azonban növeli az ausztenit mennyiségét a varratfémbe. A TIG-hegesztési varratok ferrit-ausztenit aránya közel esik az alapanyag fázisarányához.

Az eddigi eredményeink jól egyeznek a szakirodalomban fellelhető információkkal. Ahhoz azonban, hogy egyértelműen kijelenthessük, hogy melyik hegesztési eljárással lehet a leginkább megfelelő varratokat létrehozni más típusú vizsgálatok (korróziós, hajlító-, szakítóvizsgálat) elvégzése is szükséges.

### Irodalomjegyzék

- [1] Robert N. Gunn: Duplex stainless steels. Abington Publishing, Cambridge, 1999, p: 1-47, 110-143.
- [2] Szunyogh László (szerk.): Hegesztés és rokon technológiák. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 2007, p: 191-204.
- [3] V. Muthupandi, P. Bala Srinivasan, S.K. Seshadri, S. Sundaresan: Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steels. (Material Science and Engineering, A358, 2003, p: 51-57)
- [4] S. Hertzman, J. Charles: On the effect of nitrogen on duplex stainless steels. (Revue de Métallurgie, Vol:108, Issue:7-8, 2011, p:413-425)  
[http://www.metallurgical-research.org/article\\_S0035156311000713](http://www.metallurgical-research.org/article_S0035156311000713)
- [5] Komócsin Mihály: A duplex szerkezetű korrózióálló acélok és hegesztésük. (Gép, 59(1), p:24-27) <http://www.att.bme.hu/~femtech/letoltes/duplex-Komocsin-2008.pdf>